

ASPECTOS GEOTÉCNICOS FUNDAMENTALES DE LAS FORMACIONES DEL DELTA DEL RÍO PARANÁ Y DEL ESTUARIO DEL RÍO DE LA PLATA¹

Víctor A. Rinaldi², Ernesto G. Abril² y Juan J. Clariá (h)²

Resumen: El delta del Río Paraná y el estuario del Río de la Plata conforman la salida al mar de la segunda cuenca hidrográfica más importante de América del Sur. El sector se encuentra localizado en una gran depresión estructural conformada por una secuencia estratigráfica pre-holocena erosionada, sobre la cual yace una serie sedimentaria más moderna del holoceno, que constituye el delta. La gran cantidad de sedimentos que transportan las aguas, han dado lugar a la formación de islas e islotes de morfología muy cambiante. El comportamiento geotécnico de estos sedimentos es de relevancia para atender los requerimientos de uso del suelo, en este sector próximo a importantes centros urbanos y de desarrollo económico dinámico. Este trabajo presenta un estudio de los aspectos geológicos y geotécnicos más sobresalientes los suelos del Delta del río Paraná y el estuario del Río de la Plata. El trabajo incluye una revisión y síntesis de los aspectos geológicos relacionadas con el basamento del cauce del río y la secuencia sedimentaria depositada sobre el mismo. La distribución tridimensional de las distintas formaciones y litologías se describe mediante perfiles obtenidos de perforaciones geotécnicas correspondientes a estudios realizados en la región. Finalmente, se discuten los parámetros geotécnicos de los estratos más significativos identificados con énfasis en los sedimentos superiores más modernos.

Palabras clave: estuario, delta, Río de la Plata, Río Paraná

FUNDAMENTAL GEOTECHNICAL ASPECTS OF THE PARANÁ DELTA RIVER AND RÍO DE LA PLATA ESTUARY FORMATIONS

Abstract: The second most important hydrographic area of South America drains through the delta of the Paraná River and the estuary of the Río de la Plata. The delta is located on a large depression of a preholocene stratigraphy eroded and covered by modern sediments from the Holocene. The large amount of sediments transported by water, yield the formation of deltaic islands and wetlands which are actively modified with time. The geotechnical behavior of these sediments is of main interest in order to consider the requirements of the area close to important cities and industrial centers of a dynamic economical development. This work presents a study of the most important geologic and geotechnical aspects of soil formations from the delta of the Paraná River and the stuary of the Rio de la Plata. The paper includes a review of the main geological aspects including the bedrock and sediments of the river. A three dimensional distribution of the different soil formations is described by means of various soil profiles obtained from geotechnical boreholes performed for different projects in the region. Finally, the relevant geotechnical parameters for the formations ecountered are reviewed and discussed with emphasis on the upper modern sediments.

Keywords: estuary, delta, la Plata River, Paraná River.

INTRODUCCIÓN

A través del delta del Río Paraná y el estuario del Río de la Plata, que conforma su salida al mar, se drena una importante y compleja red hidrográfica cuyos principales afluentes son los ríos Paraná, Uruguay y Paraguay (Figura 1). Estos ríos encierran un área de bañados cuya extensión es la más importante del mundo en su género, donde la flora y fauna son únicas en diversidad y variedad. Se trata de un complejo sistema hídrico que acarrea una gran cantidad y variedad de sedimentos cuya dinámica de transporte y deposición modifican continuamente la morfología

¹ Artículo recibido el 29 de agosto de 2005 y aceptado el 6 de febrero de 2006.

² Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba y CONICET, Córdoba, Argentina. E-mail: rinaldiva@yahoo.com, elerness@yahoo.com

del delta y del estuario (ver, por ejemplo, Parker et al., 1987; Cavallotto 1988 y 1995; Cavallotto et al., 1999). Los depósitos sedimentarios recubren el cauce del río correspondiente a una depresión labrada en formaciones más antiguas y que afloran en las márgenes del río, donde se apoyan en la actualidad los edificios y las estructuras de las ciudades costeras (Iriondo, 1980, Parker, 1990 y Parker et al., 1994). El avance del frente sedimentario que conforma el delta del río es muy acelerado, verificándose un progreso de aproximadamente 70-100 m/año (Pizarro y Orlando, 1984). Dado que los sedimentos son muy jóvenes y se generan en un ambiente ácuo, su comportamiento corresponde a suelos normalmente consolidados, de muy baja capacidad portante. La expansión de las importantes ciudades y centros industriales circundantes y su avance sobre estas formaciones recientes, hace que el conocimiento de su comportamiento geotécnico adquiera relevancia.

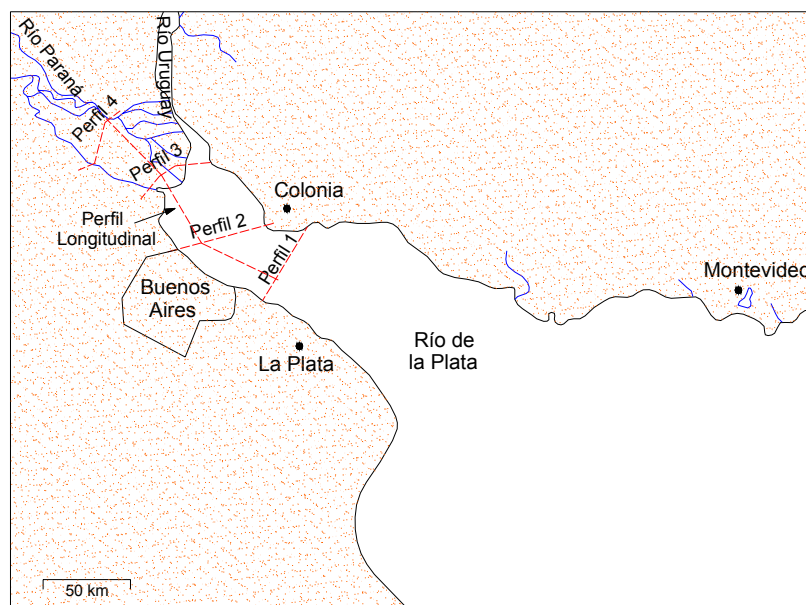


Figura 1: Ubicación en planta de los perfiles geotécnicos trazados.

El objetivo fundamental de este trabajo es describir la distribución de las distintas formaciones litológicas que componen el cauce y los sedimentos deltaicos de este sector del Río de la Plata, revisar su geología a nivel regional y describir los parámetros geotécnicos fundamentales que gobiernan su comportamiento mecánico. Para cumplimentar este objetivo, se han preparado gráficos y tablas que permite mostrar claramente el origen geológico y la secuencia cronológica de las distintas formaciones. La distribución regional de las mismas se muestra en perfiles estratigráficos desarrollados específicamente para este trabajo, basados en perforaciones geotécnicas realizadas para grandes obras proyectadas en el área de estudio. El comportamiento físico, mecánico y geofísico de las distintas formaciones se discuten mediante el apoyo de figuras y tablas aquí desarrolladas atendiendo a los requerimientos prácticos de la ingeniería geotécnica.

ASPECTOS HIDROGRÁFICOS DE LA CUENCA DEL PLATA

El delta del Río Paraná se forma en las proximidades de la confluencia de los ríos Paraná y Uruguay y ocupa una extensa depresión de aproximadamente 15000 km², en las llanuras de las provincias de Buenos Aires y Entre Ríos, siendo su desarrollo de entre 20 y 100 km de ancho, con una longitud de unos 300 km, desde la localidad de Diamante hasta el inicio del Río de la Plata. Su desembocadura al mar, forma un estuario por donde drena aproximadamente la cuarta parte del territorio de América del Sur (2.966.000 km²), a través de una compleja red hidrográfica que comprende los territorios de Uruguay, Paraguay, Noreste de Argentina, Sureste de Brasil y Sureste de Bolivia (Figura 2). Las precipitaciones anuales promedio en la cuenca del Paraná rondan los 1200mm, distribuidos entre octubre y marzo. El caudal medio de los ríos Paraná y Uruguay es de 20000 m³/s, con máximos en febrero y mínimos en agosto. Solo el Río Paraná posee un caudal de entre 18000 m³/s y 50000 m³/s en periodos de normalidad y de crecida extraordinaria, respectivamente (Pittau et al., 2001).

El río transporta sedimentos en suspensión en una concentración aproximada de 300 mg/l, lo cual se traduce en un acarreo total de materiales de aproximadamente 160 millones de toneladas anuales (Boschi, 1987). El pasaje del delta al estuario funciona como un factor de precipitación de sedimentos debido a la pérdida de velocidad del agua y a cambios en su salinidad. La deposición de sedimentos en el frente del delta genera su avance en forma continua a un ritmo de entre 70 y 100 m. Estos sedimentos están compuestos por un 28% de arcillas, 56% de limos y 16% de

cuspidales, removidas en cada creciente y redepositados sus materiales sobre la llamada pendiente frontal. La deposición de los sedimentos se produce por la pérdida de velocidad de arrastre de los sólidos en suspensión y por la floculación y precipitación.

La morfología de los deltas puede describirse según tres ambientes sucesivos que se proyectan hacia las aguas abiertas: una llanura deltaica, un frente deltaico y un pro-delta. El conjunto constituye una llanura aluvial baja formada por el tope emergido de la construcción deltaica, que es recorrida por una red de canales distributarios que se abren paso a través de los depósitos más nuevos transportando sedimentos continentales que se superponen a sedimentos marinos, más antiguos, que forman el frente deltaico. El prodelta es la parte distal y más profunda del delta y se caracteriza por la presencia de depósitos marinos finos. La dinámica de un delta es función de tres factores: los aportes y de los procesos fluviales, la energía del oleaje y las mareas, estando caracterizado el delta del Paraná por una mayor incidencia de las mareas y los procesos fluviales. La geomorfología del área del delta fue estudiada recientemente, reconociéndose ámbitos morfodinámicos característicos (Cavallotto, 1987; Parker y López Laborde, 1988 y 1989).

El delta del Paraná y el Río de la Plata conforman una entidad geológico-hidrológica dinámica de carácter sedimentario, que se encuentra comprendida en la provincia geológica de la Llanura Chaco-Pampeana, limitando al Sur con la de la Cuenca del Salado y al Nor-Este, ya en Uruguay, con ambiente de basamento. Las barrancas entrerriana y santafesino-bonaerense, revelan fallas que limitan un bloque hundido. Aunque la historia geológica de la cuenca se desarrolla sobre áreas hoy no abarcadas por la misma (Parker y Violante, 1993), las actuales islas del delta están conformadas por sedimentos fluviales clásticos, provenientes de las regiones andina y chaco-paranaense, sometidos a un régimen de mareas y a fenómenos propios de ambientes litorales. Los depósitos que conforman la estratigrafía del subsuelo del delta deben considerarse como el resultado de una sucesión comprendida entre regímenes gradacionales de ambientes fluvial, mixto y marino (Cavallotto, 1996 y 2001), en el último de los cuales se desarrolla actualmente el pro-delta del Río de la Plata. Mientras la secuencia sedimentaria del delta (Violante et al., 1992) dependió de la geometría pre-holocena de la cuenca y factores tectónicos, su evolución, y la de su entorno próximo (paleocostas) obedecieron a las oscilaciones del nivel del mar y variaciones de carácter hidrometeorológico (Cavallotto, 2001).

Se reconocen dos grandes ciclos geológicos relacionados con el origen del delta del Río Paraná (Parker, 1985), uno correspondiente al paleocauce que alberga los sedimentos y otro que comprende el relleno del mismo. A partir de este esquema general, pueden distinguirse un sustrato de apoyo (litologías basales) y los propios sedimentos (litologías cumbrales). La separación obedece a un evento orogénico (el IV movimiento Andico), expresado en un plano de abrasión, el techo del paleocauce. Cronológicamente, la secuencia corresponde a eventos pre-holocénicos (el labrado del paleocauce del Río de la Plata) y holocenos (los rellenos modernos que conforman el delta del Paraná y el lecho del Río de la Plata), respectivamente. La geología y paleogeografía ha evolucionado según episodios bien marcados y descriptos entre otros por López Laborde (1996), Urien y Ottman (1971), y Urien et al., (1980 a y b). Otros estudios permiten acceder específicamente al conocimiento de los sedimentos de fondo (Urien, 1966, 1967, 1972; Parker et al., 1985; López Laborde, 1987 a y b; Parker y López Laborde, 1989).

Tabla 1: Listado de obras y referencias de perforaciones utilizadas para el desarrollo de los perfiles transversales.

Obra	Referencia	Profundidad media de estudio	Ensayos Realizados
Complejo Zárate - Brazo Largo.	Mecánica de Suelos S.R.L. (1970).	40 m	Identificación SPT Triaxial UU
Recopilación de antecedentes de perforaciones en el Río de la Plata con perfiles geológicos.	Servicio de Hidrografía Naval (1985). Informe Técnico N° 36 / 85.	40 m	
Puente Buenos Aires Colonia	Estudio Silvano Zorzi (1989). Prot. N° 798.	40 m	Identificación SPT Triaxial UU RQD
Complejo Zárate - Brazo Largo	Agua y Energía Eléctrica (1990). S.T.Y.G. E.T. Salto Grande - E.T. General Rodríguez.	40 m	Identificación
Puente Buenos Aires - Colonia	Estudio Vardé y Asociados (1994). Estudio N° 1587. Informe Geotécnico.	40 m	Identificación SPT Triaxial UU

En la Tabla 1 se presenta un esquema en el que se muestran las relaciones cronoestratigráficas y su correspondencia con las unidades geotécnicas reconocidas. El paleocauce fue labrado sobre terrenos de edades precámbricas a pleistocenas, abarcando desde el basamento ígneo-metamórfico, aflorante en la isla Martín García y algunos sectores de la costa del Uruguay, y comprometiendo los estratos de las arcillas verdes de la formación Paraná (Mioceno), las arenas de la formación Puelche (Pleistoceno inferior) y a las toscas del Río de La Plata (Plio-Pleistoceno - Pleistoceno). Los rellenos de este antiguo lecho son conocidos como Postpampeano y tienen naturaleza continental o marina, según las oscilaciones del nivel del mar que se verifican como consecuencia de los cambios climáticos (Cavallotto, 1995 y 1996). Comienzan con las arcillas marinas pertenecientes a la formación Atalaya (Holoceno inferior) las cuales son coronadas por arenas y fangos aluvionales de la formación Playa Honda (Holoceno superior). Los materiales de superficie forman islas que están definidas por brazos fluviales entrelazados y que se encuentran actualmente sometidas a erosión. Los materiales removidos se depositan en áreas marginales de menor energía o son llevados hacia la parte distal del aparato deltaico, ya en el estuario, conformando el llamado pro-delta.

Estratigrafía

Para la descripción de la estratigrafía de los suelos del Delta del Río Paraná y el estuario del Río de la Plata, se confeccionaron cuatro perfiles transversales y uno longitudinal, cuyas trazas se muestran en la Figura 1. Estos perfiles abarcan desde la boca del Río de La Plata (Perfil 1) hasta el ápice del delta (Perfil 4).

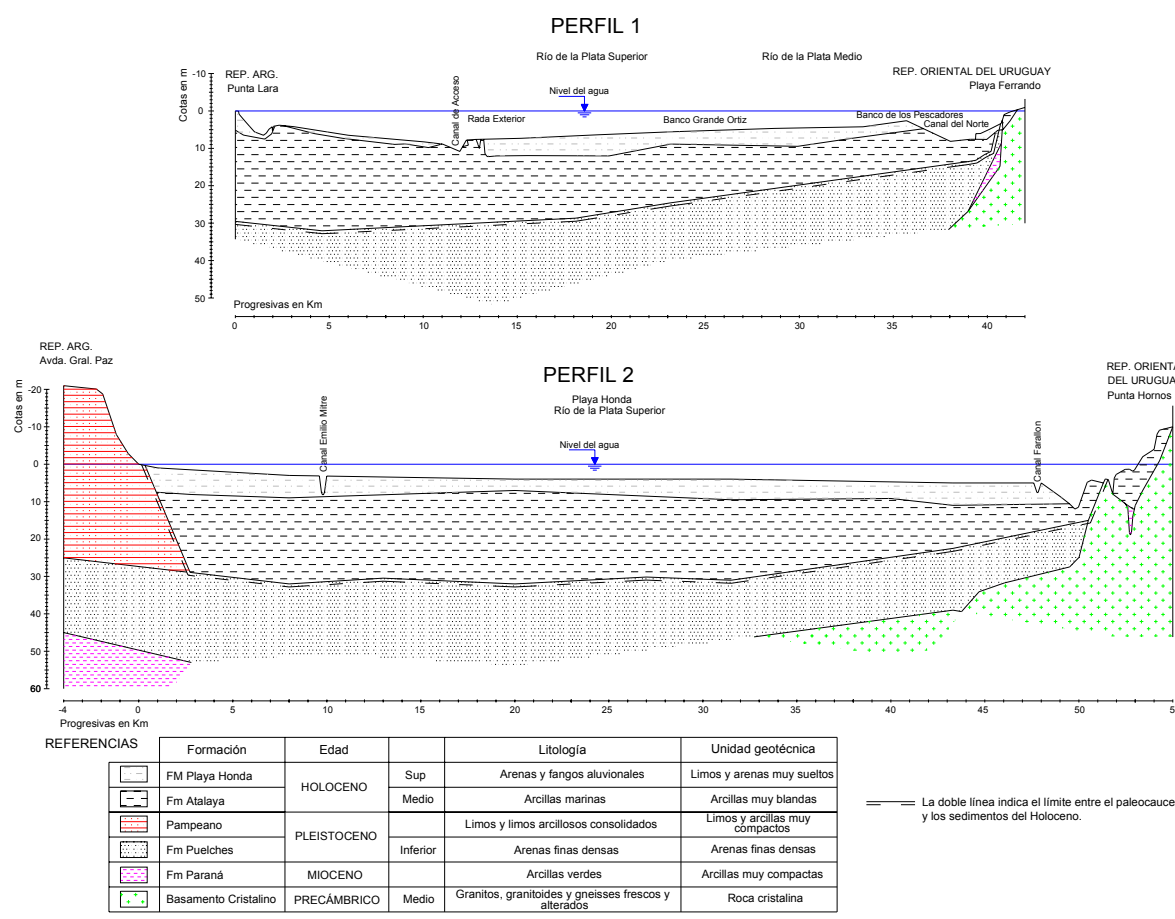


Figura 4: Perfiles estratigráficos sobre el estuario del Río de la Plata.

Las Figuras 4 a 6 muestran los perfiles transversales obtenidos para cada una de las trazas. En las mismas figuras se indican los hitos de referencia inicial y final. Para la confección de estos perfiles, se utilizó la información de perforaciones realizadas para distintas obras proyectadas en la región, listadas y referenciadas en la Tabla 1, en la que se indican también las profundidades medias alcanzadas en cada estudio y la información geotécnica disponible.

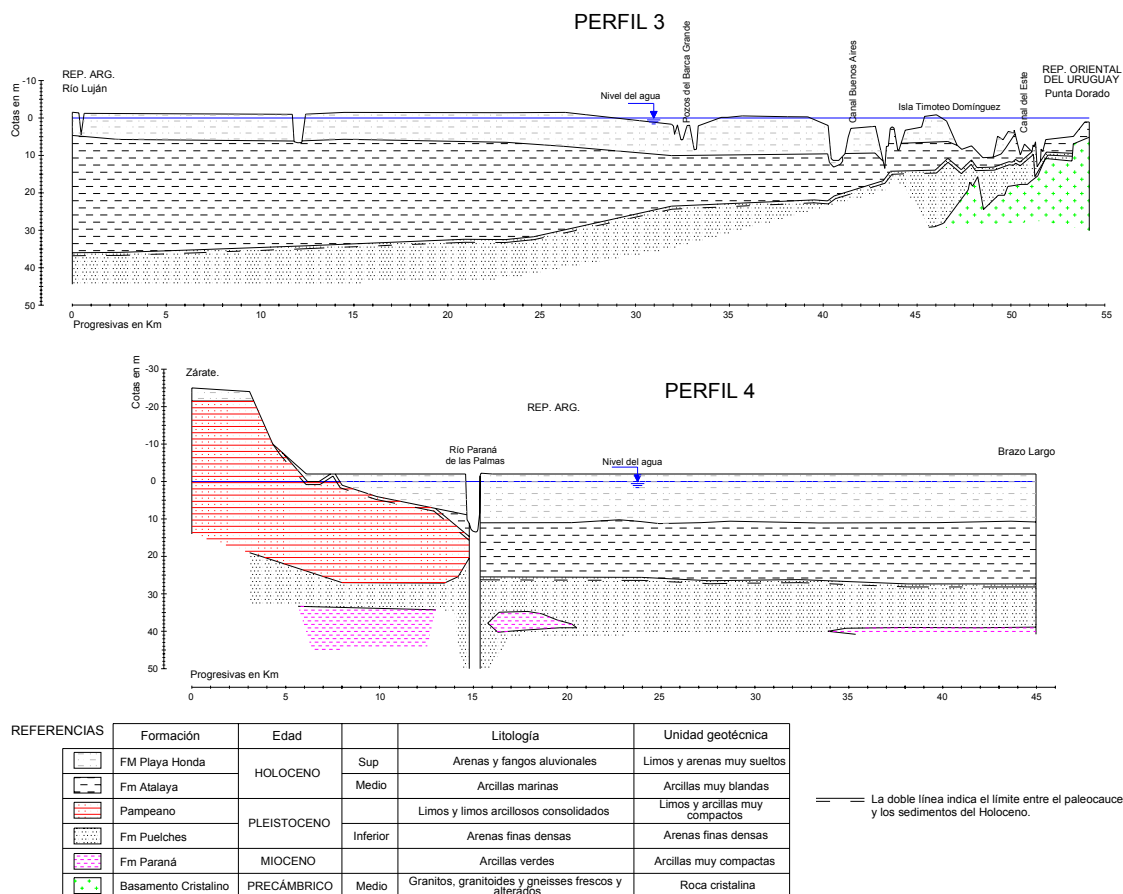


Figura 5: Perfiles estratigráficos sobre el delta del Río de la Plata.

La secuencia estratigráfica generalizada está conformada por el basamento cristalino, la formación Paraná, la formación Puelches y el Pampeano, finalizando con los depósitos postpampeanos correspondientes a las formaciones Atalaya y Playa Honda en los sectores del Río de La Plata y el delta, indicándose en los perfiles el límite entre las formaciones recientes (Holoceno) y el techo del paleocauce.

El basamento cristalino aflora en la isla Martín García y en la República Oriental del Uruguay, profundizándose hacia la cuenca del río Salado y volviendo a aflorar en el Sistema de Tandilia, en el interior de la provincia de Buenos Aires. La profundidad del basamento en la ciudad de Buenos Aires se detectó a -246m, con la presencia de gneisses (Artaza, 1942).

Sobre el margen derecho del delta se desarrolla la formación Pampeano, que ha sido erosionada por el río hasta desaparecer en el lecho del mismo. Los depósitos de esta formación se encuentran localizados en la costa de la provincia de Buenos Aires (Irigoyen, 1993), y desaparecen a pocos metros de la ribera frente a la ciudad de Buenos Aires (perfiles 2 y 4).

En el lecho del río, el paleocauce coincide con el techo de las arenas de la formación Puelches. La diferencia de cota del techo de la formación Puelches, en ambos márgenes del río, muestra que el cauce se alojaba sobre el margen occidental del estuario (cota - 35 m). Sobre la costa uruguaya se estima una cota superior a los - 20 m (Perfil No 1).

Las formaciones Atalaya y Playa Honda toman toda su dimensión en delta del río y se van sumergiendo hacia el estuario con una pendiente muy suave (perfil 5). En los sectores bajos de la provincia de Buenos Aires, localizados en la riera y el valle del arroyo la Matanza, al Sur de la ciudad, estos sedimentos aparecen en una franja de 1 a 2 km de ancho (Nuñez, 1986). El techo de la formación Atalaya se encuentra en la costa uruguaya a cota -8m y en la costa argentina a cota -5m, lo que indica que el cauce del río ha sufrido una deriva hacia el Nor-Este, concentrándose actualmente el escurrimiento sobre las costas uruguayas.

Finalmente, en los perfiles 2 y 4 puede observarse la presencia de las arcillas verdes y azules de la formación Paraná por debajo de las arenas del Puelche, a profundidades entre -30 m (Perfil 4) y -45 m (Perfil 2), siendo su cota

relativa uniforme en toda la región. En las proximidades a la ciudad de Buenos Aires, los espesores promedio de este estrato pueden resultar algo mayores a 10 m (Nuñez, 1986).

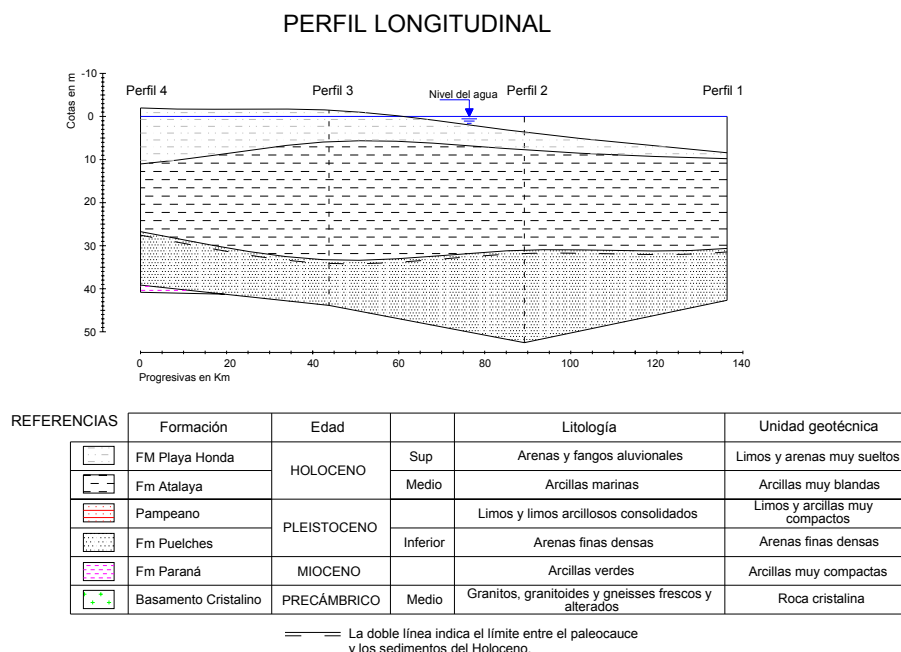


Figura 6: Perfil estratigráfico longitudinal, desde el delta hasta el estuario del Río de la Plata.

CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LAS DISTINTAS FORMACIONES

En esta sección se describen y discuten los parámetros geotécnicos fundamentales que caracterizan el comportamiento de las distintas formaciones identificadas. La descripción de los sedimentos del Postpampeano se realiza con mayor detenimiento, dado su predominio con respecto a las demás formaciones y la relevancia geotécnica que adquieren en este trabajo.

Sedimentos del Postpampeano

Los sedimentos del Postpampeano comprenden los depósitos recientes del Holoceno, conformados por limos arenosos y arcillas normalmente consolidados. El comportamiento mecánico de estos sedimentos no ha recibido atención hasta los estudios de Mauriño y Trevisan (1963) y, fundamentalmente de Sfriso (1997) y Leoni (2002). En estos sedimentos se diferencia una deposición inferior, conformada por arcillas de origen marino de coloración gris oscura verdosa, y una deposición superior de arcillas y limos arenosos de origen fluvial de coloración gris médano. Ambos estratos corresponden a las formaciones Atalaya y Playa Honda, respectivamente (ver Tabla 2). El estrato de limos superiores de la formación Playa Honda tiene un escaso espesor en el estuario del Río de la Plata (menos de 5,00 m), pero alcanza algo más de 10 m aguas arriba, en el delta del Río Paraná y hacia los márgenes del estuario. El espesor de la formación Atalaya resulta entre 5 m y 25 m en el cauce del Río de la Plata (Rinaldi et al., 2006). En los párrafos sucesivos se detallan y comentan algunos aspectos relevantes de su caracterización y comportamiento mecánico. En la Tabla 3 se han resumido los valores y las relaciones más significativas de los parámetros geotécnicos fundamentales de estas dos formaciones.

Identificación y Constantes Físicas

En el Sistema de Clasificación Unificada, los suelos de la formación Playa Honda son del tipo CL, ML y raramente SM. Los suelos de la formación Atalaya, entretanto, se clasifican como CH. En la Figura 7 se muestra la relación entre el índice de plasticidad y el límite líquido en la carta de plasticidad de Casagrande para ambas formaciones, datos obtenidos de perforaciones realizadas en los sedimentos del delta del Río Paraná. La regresión que mejor ajusta para ambas formaciones es:

$$IP = 0,72 (wL - 15) \quad (1)$$

Tabla 2: Cronoestratigrafía de la región del delta del Paraná y estuario del Río de la Plata con su correspondencia con las unidades geotécnicas identificadas en este trabajo.

Etapas	Época	Formaciones		Litología	Carácter	Costa	Unidad geotécnica ⁽¹⁾
RELLENO DE PALEOCAUCE (litologías cumbrales)	ACTUAL 0 a 2900 a 6000 a <						

(1) Correspondencia con los perfiles estratigráficos de las Figuras 4 a 8.

Tabla 3: Valores y relaciones más significativas de los parámetros geotécnicos fundamentales de las formaciones Playa Honda y Atalaya del Postpampeano.

Formación	Parámetro	Descripción	Referencia
Playa Honda (Horizonte de formación Fluvial)	CU	CL, ML, SM ⁽¹⁾	⁽¹⁾ Estudios Geotécnicos de Tabla 1. ⁽²⁾ Sfriso (1997) ⁽³⁾ Rinaldi y Zeballos (1996). ⁽⁴⁾ Rinaldi et al. (2006).
	IP (%)	10 – 20 IP = 0,72 ($w_L - 14,7$) ⁽¹⁾	
	LL (%)	20 – 40 ⁽¹⁾	
	w_n (%)	20 – 50 (generalmente $w_n > LL$) ⁽¹⁾	
	γ_d (kN/m ³)	11,5 - 14,5 ⁽¹⁾	
	γ_s (kN/m ³)	17 - 20 ⁽¹⁾	
	k (cm/s)	$10^{-5} - 10^{-6}$ ⁽²⁾	
	N (SPT)	N < 10 ⁽¹⁾	
	s_u (kPa)	20 – 40 ⁽¹⁾	
	ϕ' (°)	25 -30 ⁽²⁾	
	E_u (kPa)	~ 2000 ⁽²⁾	
	C_c	0,20 – 0,30 ⁽²⁾	
	V_s (m/s)	150 – 200 $V_s = 40 (\sigma_o')^{0,35}$ ⁽³⁾	
Atalaya (Horizonte de formación Marina)	ρ (Ohm-m)	12 – 20 ⁽⁴⁾	
	CU	CH ⁽¹⁾	⁽¹⁾ Estudios Geotécnicos de Tabla 1. ⁽²⁾ Sfriso (1997), ⁽³⁾ Leoni (2002), ⁽⁴⁾ Rinaldi y Zeballos (1996). ⁽⁵⁾ Rinaldi et al. (2006).
	IP (%)	50 – 70 IP = 0,72 ($w_L - 14,7$) ⁽¹⁾	
	LL (%)	60 – 110 ⁽¹⁾	
	w_n (%)	80 – 90 ⁽¹⁾	
	γ_d (kN/m ³)	7 – 10 ⁽¹⁾	
	γ_s (kN/m ³)	14 - 16 ⁽¹⁾	
	k (cm/s)	$10^{-6} - 10^{-8}$ ^{(1) (2)}	
	N (SPT)	N < 5 ⁽¹⁾	
	s_u (kPa)	10 – 35 $s_u = 1,82 z + 3,91$ ⁽³⁾	
	ϕ' (°)	20 ⁽²⁾	
	E_u (kPa)	1500 – 3000 ⁽¹⁾ $E_u = 490 C_u$ ⁽³⁾	
	C_c	0,45 1,10 $C_c = 0,009 (w_L - 10)$ ^{(1) (3)} $C_c = 0,38 e_o - 0,15$ ⁽³⁾	
	V_s (m/s)	100 – 150 $V_s = 24 (\sigma_o')^{0,40}$; σ_o' (kPa) ⁽⁴⁾	
	ρ (Ohm-m)	1,2 – 3 ⁽⁵⁾	

Estos valores se encuentran por sobre la línea A de la carta de Casagrande y resultan algo mayores que la relación obtenida por Sfriso (1997):

$$IP = 0,86 (w_L - 23) \quad (2)$$

Las variaciones de los pesos unitarios secos de las formaciones del Postpampeano en el delta del río se presentan en la Figura 8.a. El resultado es típico de suelos depositados en ambiente litoral, en donde una capa de mayor peso unitario de limos y arenas se superpone a suelos más plásticos y fangosos, con menores pesos unitarios. El peso unitario promedio de los limos de la formación Playa Honda resulta de 13,2 kN / m³, con una amplia variación en superficie debido posiblemente a la precarga ocasionada por oscilaciones estacionales del contenido de humedad. En el delta del río, las arcillas de la formación Atalaya poseen una densidad promedio de 8,2 kN / m³. En el lecho del cauce del Río de la Plata, los valores aportados por Leoni (2002) resultan ligeramente menores (un promedio de 7,3 kN/m³). Este autor señala un aumento del peso unitario con la profundidad, lo que se espera que ocurra para suelos normalmente consolidados. Los pesos unitarios recopilados para este trabajo resultaron prácticamente independientes de la profundidad. Las humedades naturales correspondientes a la saturación (Figura 8.b) oscilan entre 20 % y 50 % para la formación Playa Honda y entre 50 % y 90 % para la formación Atalaya.

Compresibilidad

La compresibilidad de estas formaciones es relativamente elevada, dados los bajos valores de pesos unitarios y elevados contenidos de humedad de saturación. En la Figura 9 se presenta la curva de compresibilidad de una arcilla de la formación Atalaya. La curva muestra tres tramos característicos; un primer tramo de recarga, hasta alcanzar la fluencia bien definida, y dos tramos con distintas pendientes posteriores a la fluencia. El primer tramo postfluencia resulta más elevado (aproximadamente en un 50 %), debido a la desestructuración del suelo con respecto a la compresibilidad del segundo tramo (Nuñez, 1986). En la misma curva, se indica la presión efectiva vertical in-situ junto con la presión de fluencia de mayor valor. En general, los suelos de esta formación poseen una ligera sobreconsolidación (OCR entre 1 y 1,50). La Figura 10 grafica la relación entre las tensiones de fluencia

(preconsolidación) y la tensión vertical efectiva para distintas muestras extraídas del estuario del Río de la Plata, frente a la ciudad de Buenos Aires.

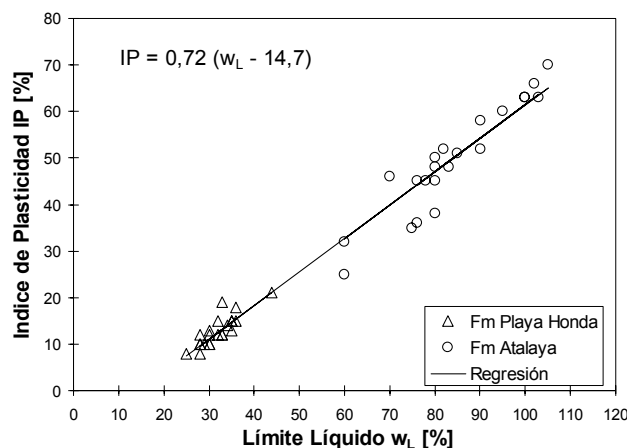


Figura 7: Relación entre el índice de plasticidad y el límite líquido para los sedimentos del Postpampeano en el Delta del Río Paraná.

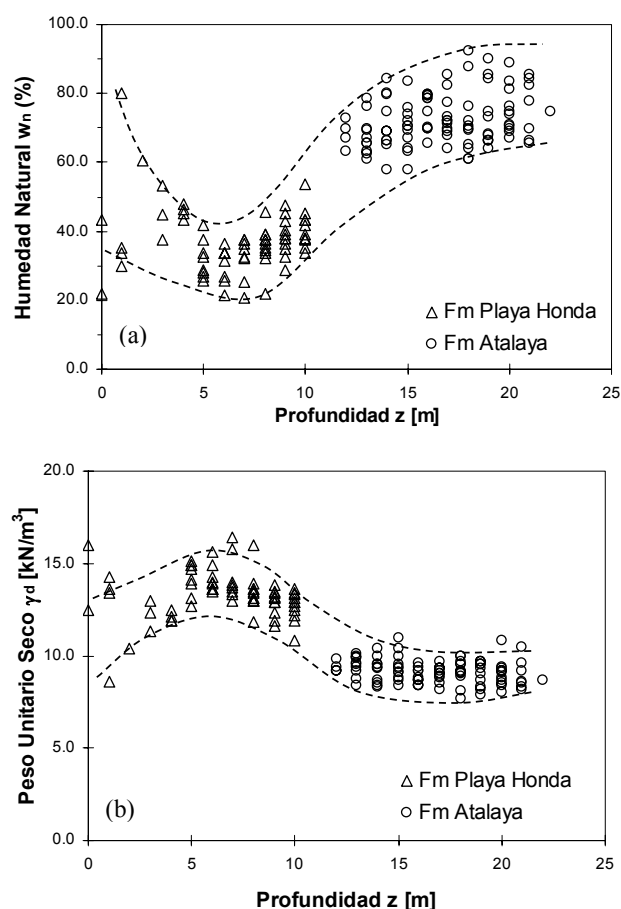


Figura 8: Humedad natural (a) y peso unitario seco (b) de las Formaciones del Postpampeano en el sector del delta del Río Paraná.

El quiebre marcado en el punto de fluencia indica un suelo con una cierta estructuración, debido a modificaciones posdeposicionales. Sfriso (1997) y Leoni (2002) mostraron que el índice de compresibilidad para los suelos de la formación Atalaya se encuentra comprendido entre las expresiones propuestas por Terzaghi y Peck (1967):

$$\text{Para arcillas indisturbadas} \quad C_c = 0,009 (w_L - 10) \quad (3)$$

$$\text{Para arcillas remoldeadas} \quad C_c = 0,007 (w_L - 10) \quad (4)$$

Adicionalmente, Leoni (2002) determinó el índice de compresibilidad en función de la relación de vacíos y la humedad natural como:

$$C_c = 0,38 e_o - 0,15 \quad (5)$$

$$C_c = 0,99 (w_n)^{1,32} \quad (6)$$

El coeficiente de consolidación unidimensional recomendado por Sfriso (1997) para la formación Atalaya es:

$$\log C_v = -w_L / 20 \quad (\text{cm}^2 / \text{s}) \quad (7)$$

Valores promedio obtenidos por Guichon (2005) para la formación Playa Honda resultan $1 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ y de $5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ para la formación Atalaya.

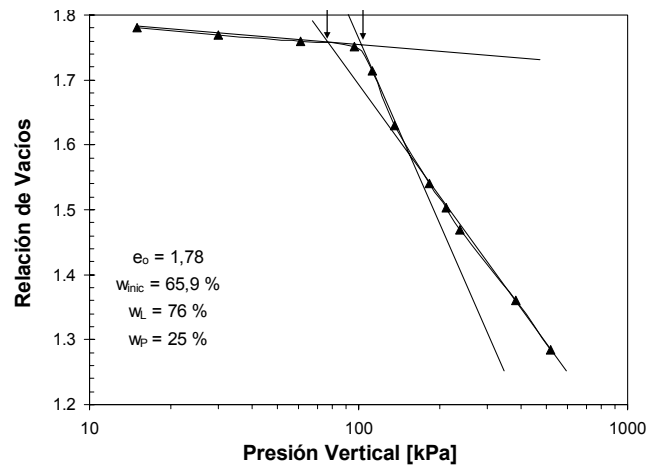


Figura 9: Curva de compresibilidad para un ensayo de consolidación unidimensional de una muestra de arcilla de la Formación Atalaya (Sfriso, 1997).

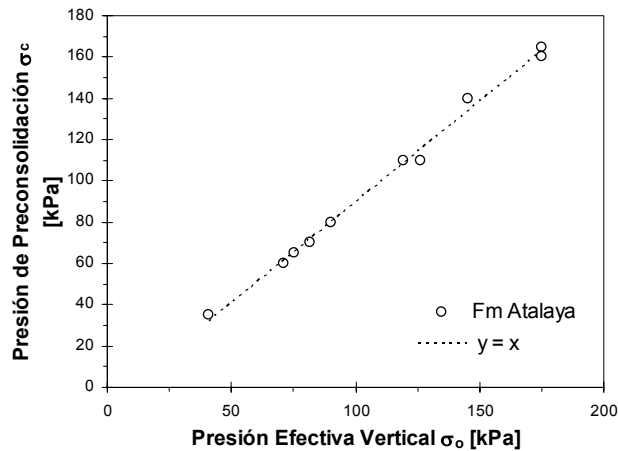


Figura 10: Variación de la presión de preconsolidación para la Formación Atalaya del Postpampeano en el sector del Río de la Plata (Leoni, 2002).

No se han podido obtener resultados de ensayos suficientes para valorar el coeficiente de permeabilidad de estas formaciones. Algunos valores orientativos obtenidos indican que para la formación Playa Honda los valores oscilan entre $10^{-5} \text{ cm} / \text{s}$ y $10^{-6} \text{ cm} / \text{s}$, mientras que, para la formación Atalaya, entre $10^{-6} \text{ cm} / \text{s}$ y $10^{-8} \text{ cm} / \text{s}$ (Sfriso, 1997; Guichon, 2005).

Resistencia al Corte

Los limos y las arcillas de las formaciones mencionadas muestran muy baja resistencia a la penetración (resultados SPT entre 0 y 5 golpes, usualmente inferiores a 2). En general, no se observa dependencia de la profundidad de investigación.

La Figura 11.a muestra el resultado de un ensayo triaxial CU para una arcilla de la formación Atalaya. Nótese, que la curva se aproxima a una hipérbola y la muestra desarrolla elevadas presiones de poros, aunque no alcanza en este caso el valor de la presión de confinamiento. El parámetro de presión de poros A_f de Skempton resulta para este caso aproximadamente 1. En general, su valor varía entre 0,85 y 1,40 (Sfriso, 1997).

Para las formaciones del Postpampeano, la resistencia al corte no drenado (C_u) se muestra en la Figura 12. Los valores de este parámetro presentan cierta dependencia de la profundidad del estrato. Para ensayos de corte realizados mediante la veleta y presiómetro de Menard, en la formación Atalaya, Leoni (2002) obtuvo la relación:

$$C_u = 1,82 z + 3,91 \quad (8)$$

En función de la presión geostática (σ_v') resulta:

$$C_u = 0,21 (\sigma_v') + 5,5 \quad (9)$$

En donde z está expresada en metros y C_u y σ_v' en kPa. Valores inferiores en un 35% a los expresados en las ecuaciones (8) y (9) fueron informados por Sfriso (1997) para muestras ensayadas en compresión triaxial no drenadas obtenidas frente a la ciudad de La Plata. Esta diferencia puede atribuirse al efecto de alteración de la muestra, debido al método de muestreo empleado.

En condiciones drenadas, Sfriso (1997) y Guichón (2005) obtuvieron valores del ángulo de fricción efectivo de 30° para la formación Playa Honda y 20° para la formación Atalaya, siendo la cohesión nula en ambos casos.

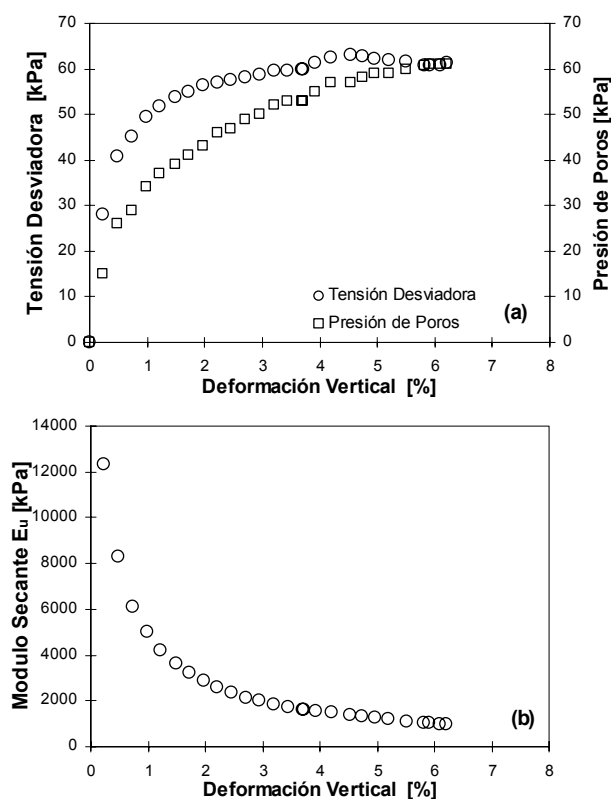


Figura 11: Ensayo triaxial consolidado no drenado (CU) para una arcilla de la Formación Atalaya, consolidada a la presión efectiva de 100 kPa (gentileza de Ing. Leoni y asociados). Profundidad: 11,00 m, $w_n = 8,6\%$, $\gamma_d = 9,4 \text{ kN/m}^3$. (a) Variación de la tensión desviadora y la presión de poros, (b) variación del módulo de elasticidad no drenado secante.

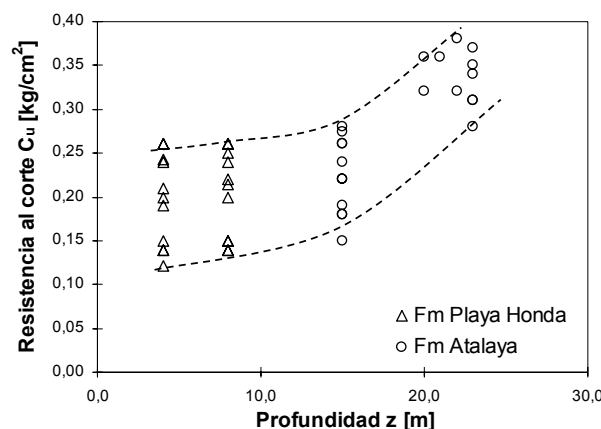


Figura 12: Resistencia al corte no drenada de las Formaciones del Postpampeano en el sector del delta del Río Paraná.

El coeficiente de relación de tensiones efectivas en reposo k_o , que se puede obtener mediante la expresión de Brooker e Ireland (1965), para arcillas normalmente consolidadas, es $k_o = (1 - \text{seno } \phi)$. Los valores promedio resultan $k_o = 0,5$ para la formación Playa Honda y $0,7$ para la formación Atalaya. Para los valores promedio de $IP = 15$ e $IP = 50$ de ambas formaciones, respectivamente, estos valores concuerdan razonablemente con la relación propuesta por Massarsch (1979):

$$k_o = 0,44 + 0,42 \frac{IP}{100} \quad (10)$$

Leoni (2002) evaluó la sensibilidad de las arcillas de la formación Atalaya y encontró una variación de 1 a 4, con algunos valores dispersos de hasta 20. Estos valores indican que la arcilla posee una cierta estructuración en condiciones inalteradas, lo cual corrobora lo expresado en el análisis de la curva de compresibilidad. La sensibilidad puede haberse originado por añejamiento, lo cual se traduce en una ligera cementación. Adicionalmente, los autores del presente trabajo sugieren que el mecanismo más probable puede deberse al típico proceso de formación de las arcillas ligeras (quick clays) donde ocurre una reducción de la concentración de cationes monovalentes de sodio en arcillas de origen marino cuando se encuentran en presencia de aguas dulces. La disminución de cationes produce un aumento de los espesores de la doble capa adsorbida de las partículas y un incremento en la repulsión entre partículas. El exceso de fuerzas de repulsión no modifica la fábrica in-situ del suelo pero sí origina, después del remoldeo, una estructura dispersa con resistencia al corte más baja (Mitchell, 1993).

Rigidez

Mediciones realizadas sobre estos sedimentos por los autores, permitieron determinar velocidades de propagación de ondas de corte entre 150 m/s y 200 m/s para los limos de la formación Playa Honda y velocidades menores que 150 m/s para las arcillas de la formación Atalaya. Ante la falta de mayor información, los valores de velocidad de propagación de onda de corte se pueden aproximar mediante las siguientes expresiones:

$$\text{Limos, formación Playa Honda} \quad V_s = 40 (\sigma_o')^{0,35} \quad (11)$$

$$\text{Arcillas, formación Atalaya} \quad V_s = 24 (\sigma_o')^{0,40} \quad (12)$$

En las ecuaciones (11) y (12), la velocidad está expresada en m/s y la presión media de confinamiento efectiva $\sigma_o' = \sigma_v' (1 + 2k_o)/3$ en kPa.

Para estos sedimentos, el módulo de Young máximo, para deformaciones menores que 10^{-5} , se puede obtener a partir de la velocidad de onda de corte mediante la expresión:

$$E_{max} = 2 (1 + \mu) (V_s)^2 \cdot \rho \quad (13)$$

donde ρ es la densidad media total del suelo y μ es el coeficiente de Poisson.

Para suelos normalmente consolidados y saturados, puede asumirse $\mu = 0,5$. De lo expuesto, el módulo E_{max} , expresado en kPa, resulta:

$$\text{Limos, formación Playa Honda} \quad E_{max} = 8100 (\sigma_o')^{0,7} \quad (14)$$

$$\text{Arcillas, formación Atalaya} \quad E_{max} = 2600 (\sigma_o')^{0,8} \quad (15)$$

Para ambas formaciones, y para los módulos de elasticidad iniciales no drenados (E_i), Sfriso (1997) reportó valores de ensayos triaxiales comprendidos entre 17 MPa y 25 MPa. Estos valores mostraron concordancia con retrocálculos realizados para estructuras instrumentadas comunicadas por el mismo autor. Aún así, éstos resultan muy inferiores a los determinados mediante las expresiones (14) y (15). La razón de esta diferencia debe atribuirse a que en el caso de los ensayos triaxiales, las deformaciones iniciales resultan del orden de 10^{-3} aún cuando se aplique el método de la hipérbola para extrapolar el módulo a deformaciones menores a las iniciales capturadas durante el ensayo. En la Figura 11.b se muestra la variación del módulo secante para un ensayo triaxial no drenado. Nótese que los valores iniciales se encuentran en concordancia con los informados por otros autores y el rápido decaimiento del mismo con las deformaciones. Leoni (2002) obtuvo una relación entre el módulo de elasticidad inicial y la presión vertical efectiva de la forma:

$$\text{Arcillas, formación Atalaya} \quad E_i = 84 (\sigma_v') + 2200 \quad (16)$$

donde E_i y σ_v' se encuentran en kPa

La relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia al corte no drenada se puede estimar, según Sfriso (1997) y Leoni (2002), como:

$$C_u \text{ de ensayos triaxiales} \quad E_i = 580 C_u \quad (17)$$

$$C_u \text{ de ensayos veleta o Menard} \quad E_i = 400 C_u \quad (18)$$

donde C_u y E_i están expresadas en las mismas unidades.

Parámetros Geofísicos

Son escasos los trabajos de índole geofísico publicados que informen sobre los parámetros de propagación de ondas en los suelos de las distintas formaciones del delta del Paraná. Una de las razones fundamentales para ello radica en el efecto de apantallamiento acústico que provocan los sedimentos del lecho del Río de la Plata, con un permanente burbujeo de los gases producto de la descomposición de la materia orgánica presente en los sedimentos (Parker y Paterlini, 1990). Este efecto, muy común en los sedimentos litorales y lacustres, restringe el empleo de métodos sísmicos basados en la reflexión de ondas y promueve el empleo de métodos eléctricos (Rinaldi et al., 2002 y 2006). Por tal motivo, los datos de estos parámetros se limitan a resultados de laboratorio y ensayos de cross-hole realizados sobre los sedimentos en la ribera del río (Rinaldi y Zeballos, 1996). Para la estimación de las velocidades de onda de corte, pueden emplearse las aproximaciones dadas por las ecuaciones (11) y (12). No se tienen datos de mediciones de velocidad de propagación de ondas de compresión en estos sedimentos pero, dada su condición de normalmente consolidados, baja rigidez del esqueleto mineral y saturación completa, su valor debería aproximarse a la velocidad del agua (1480 m/s).

Los métodos eléctricos han mostrado ser una alternativa geofísica adecuada para superar las limitaciones de los métodos sísmicos. Las mediciones eléctricas implementadas en agua por Rinaldi et al. (2006) permitieron cartografiar la variación estratigráfica de estos sedimentos frente a la ciudad de Buenos Aires con suficiente aproximación. A partir de este trabajo, se determinó una resistividad eléctrica de entre 12 Ohm-m a 20 Ohm-m para los limos arenosos de la formación Playa Honda y de 1,2 Ohm-m a 3 Ohm-m para las arcillas de la formación Atalaya, lo cual confirma el origen marino de este último.

Formaciones del Paleocauce

Formación Pampeana

La formación Pampeana o Pampeano se desarrolla fundamentalmente en la provincia de Buenos Aires, donde alcanza espesores de hasta 60 m, en la zona costera del río, donde ha sido erosionado pero subsisten algunos relictos. El suelo de esta formación corresponde a limos y arcillas muy compactas (CL y ML), altamente preconsolidadas por desecación. Algunos niveles muestran cementación muy elevada, calcáreas y con óxidos, denominándose las localmente como toscas. Los niveles cementados aparecen como lentes de entre 0,50 m y 2,00 m de espesor. En esta formación, se puede diferenciar un estrato superior, de limos de origen eólico, retransportados y redepositados por el agua, y un estrato inferior, más arcilloso, que también sería de origen eólico pero que se ha depositado en ambiente fluvial (González Bonorino, 1965; Bolognesi, 1975). Los sucesivos períodos de sequía y humedecimiento serían la causa de su elevada presión de preconsolidación, aún con relaciones de vacíos muy altas. Bolognesi (1975) y Nuñez

(1986) estimaron que este suelo podría haber soportado presiones capilares de entre 5 y 10 kg/cm² durante su formación. La resistencia al corte de estos sedimentos es muy elevada y depende de los niveles de cementación. La resistencia a la penetración medida con el penetrómetro estándar (SPT) resulta superior a los 20 golpes y normalmente más de 60 golpes en niveles cementados. La velocidad de propagación de ondas global del estrato, medida en ensayos cross-hole, resulta independiente de la profundidad y con valores próximos a 800 m/s en estratos cementados. La resistividad eléctrica determinada por los autores en condiciones saturadas oscila entre 25 Ohm-m, para niveles arcillosos, y 45 Ohm-m, para niveles más limosos, en condiciones saturadas. Otros parámetros geotécnicos de interés se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4: Valores y relaciones más significativas de los parámetros geotécnicos fundamentales de la Formación Pampeano.

Formación	Parámetro	Descripción	Referencia
Pampeano (Horizonte de formación eólico Fluvial)	CU	ML, CL ⁽¹⁾	⁽¹⁾ Nuñez (1997), ⁽²⁾ Bolognesi (1975), ⁽³⁾ Mediciones realizadas por los Autores.
	IP (%)	5 – 20 ⁽¹⁾	
	LL (%)	30 – 50 ⁽¹⁾	
	w _n (%)	w _l > w _n > w _p 30 a 40 ⁽¹⁾	
	γ _s (kN/m ³)	□ _s = 19,5 a 20,0 ⁽¹⁾	
	k (cm/s)	10 ⁻⁴ – 10 ⁻⁷ Función de w _l ^{(1) (2)}	
	N (SPT)	N > 20	
	s _u (kPa)	50 a 200 ⁽¹⁾	
	φ _u (°)	10 a 25 ⁽¹⁾	
	C _c	0,20 a 0,60 ⁽²⁾	
	V _s (m/s)	800 a 1000 ⁽³⁾	
	ρ (Ohm-m)	25 a 45 ⁽³⁾	

Basamento Cristalino

La estructura del basamento en la zona del delta ha sido estudiada recientemente por gravimetría (Costa y Paterlini, 2003). Los afloramientos en la isla Martín García están representados por anfíbolitas, gneises y esquistos. En el departamento Colonia (Uruguay) se describen migmatitas y granitos anatócticos (Bossi, 1969). Rocas de estos tipos, analizadas para Tandilia, muestran una composición de anfíbolitas: 2,93 gr/cc, gneises: 2,17 gr/cc, migmatitas: 2,65 – 2,73 gr/cc y granitos anatócticos: 1,62 – 2,77 gr/cc (Kostadinoff, 1995). Generalmente, los primeros metros de esta formación rocosa se encuentran muy alterados, con formación de arcillas residuales muy plásticas, con relictos de la roca madre. En testigos extraídos del basamento en el subsuelo del puerto de la ciudad de Montevideo se obtuvieron valores de resistencia a la compresión simple de entre 12 y 25 MPa promedio (Torres, 2005).

Formación Puelches

Las Arenas Puelches, o Puelchense, son depósitos continuos de carácter continental, reconocidos en parte de las provincias de Córdoba, Santa Fe, Buenos Aires y la franja oriental del Chaco. Constituyen una secuencia de arenas finas cuarzosas, pardo amarillentas a blanquecinas, con una buena selección granulométrica y composicional, con intercalaciones arcillosas (formación Paraná) de variado espesor (Santa Cruz, 1972). Esta formación constituye uno de los acuíferos más importantes de esta parte del continente. Se trata de arenas muy densas, uniformes (SP y SP-SM) con espesores promedio de 25m. La resistencia a la penetración, en general, supera los 30 golpes en el ensayo estándar de penetración (SPT). La porosidad es de entre 35 % y 38 % y la velocidad de onda de compresión está comprendida entre 600 y 700 m/s. La velocidad de onda de corte para este estrato puede aproximarse, según Rinaldi y Zeballos (1996), a:

$$V_s = 80 (\sigma_o')^{0,22} \quad (19)$$

Por su parte, la resistividad eléctrica del Puelchense oscila entre 75 y 140 Ohm-m (Rinaldi et. al, 2006).

Formación Paraná

Los estratos de la formación Paraná son de origen marino y están conformados por arcilitas limo-arenosas, en ocasiones calcáreas, de color gris verdoso, con intercalaciones de areniscas cuarzosas gris amarillentas (Mioceno tardío). Presentan tres niveles: uno basal, muy difundido, compuesto por arcillas verdes y verde grisáceas con yeso, otro intermedio, constituido por areniscas grises finas a medianas, con intercalaciones de arcilla gris, en ocasiones arenosa y con fósiles, y un nivel superior, no siempre presente (erosionado), constituido por arcillas arenosas,

calcáreas, que presenta capas de conglomerados. Desde el punto de vista geotécnico, se clasifican como MH y muestran valores de peso unitario seco entre 10 y 12 kN/m³. El espesor promedio en la zona del delta y la provincia de Buenos Aires es de 10 m. La consistencia de la arcilla es importante, con resistencia a la penetración normal estandar (SPT) mayor que 20 golpes y una resistencia al corte, no drenado, entre 90 y 150 kPa. A pesar de su compacidad, el suelo se encuentra normalmente consolidado bajo el peso de los estratos superiores del Pampeano (Nuñez, 1986). La velocidad de propagación de ondas de compresión de este estrato es de 800 a 900 m/s. La velocidad de onda de corte para el estrato puede aproximarse mediante la expresión de Rinaldi y Zeballos (1996):

$$V_s = 68 (\sigma_o')^{0.19} \quad (20)$$

DISEÑO DE FUNDACIONES

Las soluciones de fundaciones para estructuras importantes relevadas en la región, permiten observar que las mismas son materializadas mediante pilotes hincados o preperforados con lodos bentoníticos con apoyo sobre los estratos del Pampeano o en arenas densas de la formación Puelches. La fricción negativa por consolidación de los estratos arcillosos del Postpampeano debe disminuirse a los fines de evitar la sobrecarga y la falla por compresión de los pilotes. Para reducir la fricción, se emplean localmente algunas pinturas de tipo asfálticas.

En ciertos casos particulares para el apoyo de tanques de combustibles y silos de almacenamiento, que abundan en los puertos, sobre el margen derecho del Río Paraná, se han relevado soluciones constructivas para fundaciones que emplean el método de precarga, el cual se materializa mediante terraplenes que posteriormente son removidos para el apoyo de la estructura definitiva. La aceleración de la consolidación de las arcillas se logra mediante pozos de arena y gravas.

No se conocen aplicaciones de métodos de mejoramiento de suelos, tales como el empleo de columnas de gravas, estabilización con cal o jet grouting que se pueden considerar alternativas técnicas factibles de implementar en este tipo de suelos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su profundo agradecimiento al Ing. Ricardo Rocca, al Lic. Martín Guichon y a los Ings. Augusto Leoni y Pablo Torres, por su desinteresado aporte de datos, bibliografía y comentarios a este estudio.

REFERENCIAS

- Ameghino F. (1889). "Contribución al conocimiento de los mamíferos fósiles de la República Argentina". Actas Acad. Nac. Ciencias Córdoba VI. Córdoba, Argentina.
- Amsler M. (1995). "Carga de lavado del Río Paraná en sus tramos medio e inferior, Origen, comportamiento anual, concentraciones y caudales sólidos". En Pittau, M., A. Sarubbi y A. Menéndez. Análisis del avance del frente del delta del Río Paraná. INA, Laboratorio de Hidráulica. Buenos Aires.
- Artaza E. (1942). "Saneamiento Urbano en la República Argentina". Provisión de agua y desagües urbanos. Cuadernos 5 y 6. UNLP, Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas.
- Bolognesi A. J. L. (1975). "Compresibilidad de los Suelos de la Formación Pampeano", V Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Buenos Aires, Vol. 5, pp. 255 - 302.
- Boschi E. E. (1987). "El ecosistema estuarial del Río de La Plata (Argentina-Uruguay)". Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero, Mar del Plata, Argentina. Anales Inst. Ciencias del Mar y Limnología.
- Bossi J. (1969). "Geología del Uruguay". Colección Ciencias 2, 2ª. Ed., Universidad Nacional de la República, Montevideo.
- Brooker E. W. e Ireland H. O. (1965). "Hearth Pressures at Rest Related to Stress History", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 2, No.1, pp 1-15.
- Cavallotto J. L. (1987). "Dispersión, transporte, erosión y acumulación de sedimentos en el Río de la Plata". Informe final de Beca de Iniciación. Comisión de Investigaciones Científicas, La Plata - Rep. Argentina.
- Cavallotto J. L. (1988). "Interpretación morfológica del Río de la Plata". Simposio Internacional sobre el Holoceno en América del Sur, Paraná, Entre Ríos, Resúmenes: pp. 65-68.
- Cavallotto J. L. (1995). "Descripción de la unidad morfológica Río de la Plata". 4as. Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses. Junín, Vol. 1: pp. 231-238.
- Cavallotto J. L. (1996). "Estratigrafía del Holoceno de la Llanura costera del margen sur del Río de la Plata". XIII Congreso Geológico Argentino – 3er. Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Buenos Aires, Vol. 4: pp. 51-68.
- Cavallotto J. L. (2001). "Evolución holocena de la llanura costera del margen Sur del Río de la Plata". Rev. Asoc. Geol. Arg., Vol. 57 n.4.
- Cavallotto J. L., Violante R. A. y Parker G. (1999). "Historia evolutiva del Río de la Plata durante el Holoceno". XIV Congreso Geológico Argentino. Salta, Vol. 1: pp. 508-511.

- Cortelezzi, C., R. Y Lermann, J. C., (1969). Estudio de las Formaciones Marinas de la Costa Atlántica de la Provincia de Buenos Aires. VIII Congreso Mundial del INQUA, Paris. pp. 135-164
- Costa I. P. y Paterlini C. M. (2003). "Gravimetría en el delta del Paraná Inferior". Contribuciones a la Geodesia aplicada. UBA. 2003-1.
- Fidalgo, (1973). Léxico estratigráfico de Argentina. Servicio Geológico Minero Argentino
- Frenguelli J. (1937). "Apuntes sobre el intersevadense del subsuelo de Buenos Aires". Museo La Plata. Geología, IV.
- Frenguelli J. (1950). "Addenda a la flora del Gondwana superior en la Argentina". II Rev. Asoc. Geol. Arg., Vol. 1, Buenos. Aires.
- González Bonorino F. (1965). "Mineralogía de las fracciones arcilla y limo del Pampeano del área de la Ciudad de Buenos Aires y su significado estratigráfico y sedimentológico". Rev. Asoc. Geol. Arg. T XX: 1.
- Groeber P. (1959). "Supracretácico. Geografía de la R. Argentina II", 2da. Parte Soc. Arg. De Est. Geog., GAEA.
- Guichon M. (2005). Comunicación personal.
- Harrington HJ. (1972). Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires. En: Leanza, A., (Ed.) Primer Simposio de Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias de Córdoba, Vol. 2, pp. 967-983
- Irigoyen M. R. (1993). "Morfología y Geología de la ciudad de Buenos Aires. Evaluación e Incidencia geotécnica". Actas Asoc. Arg. Geol. Aplic. Ing. Vol VII. P. 7-38. Buenos Aires.
- Iriondo M. (1980). "El Cuaternario de Entre Ríos". Rev. Asoc. Cienc. Nat. Litoral, n°11, pp. 125-141, Santa Fe, Argentina.
- Kostadinoff J. (1995). "Delineación de estructuras, litología y espesor de corteza terrestre en áreas continentales y marinas del sistema de sierras de Tandilia (Prov. de Buenos Aires)". Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Astronómicas, y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata.
- Leoni A. J. (2002). "Caracterización de Arcillas de la Formación Post Pampeano del Lecho del Río de la Plata". XVI Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería en Fundaciones (GEOPATAGONIA 2002), Trelew, Argentina.
- López Laborde J. (1987a). "Caracterización de los sedimentos superficiales de fondo del Río de la Plata Exterior y Plataforma adyacente". II Congreso Latinoamericano sobre Ciencias del Mar, Res.: 47. Anales Cient., Univ. Nac. Agraria La Molina, Vol. 2: pp. 33-47.
- López Laborde J. (1987b). "Distribución de sedimentos superficiales de fondo del Río de la Plata Exterior y Plataforma adyacente". Invest. Oceanológicas Vol. 1(1): pp. 19-30.
- López Laborde J. (1996). "Marco geomorfológico y geológico. El Río de la Plata, una visión sobre su ambiente". Cap I. Conferencia ECOplata'96, Noviembre 1996. Oficina de Coordinación Proyecto EcoPlata, Montevideo. 45 p.
- Massarsch K. R. (1979), "Lateral Herat Pressure in Normally Consolidated Clay" Proc. Of the VII European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brighton, England, Vol. 2, pp. 245-250.
- Mauriño V. E. y Trevisan S. J. (1963). "Condiciones Geológicas y Geomecánicas del Subsuelo de la Ciudad de la Plata y sus Alrededores", II Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería en Fundaciones COPAMSEF, Brasil, pp. 5-24.
- Mitchell J. K. (1993). "Fundamentals of Soil Behavior". Second Edition, John Wiley & Sons.
- Mitchum Jr., R. M., (1977), Seismic stratigraphy and global changes of sea-level, Part II Glossary of terms used in seismic stratigraphy, en C. E. Clayton, ed., Seismic stratigraphy - applications to hydrocarbon exploration, v. Memoir 26, Tulsa, Oklahoma, AAPG, pp. 49-212.
- Núñez E. (1986). "Panel Report: Geotechnical Conditions in Buenos Aires City", 5th International Congress, International Association for Engineering Geology (IAEG), Buenos Aires, Argentina, Vol. 8, pp. 2623 – 2630.
- Orfeo O. (1995). "Sedimentología del Río Paraná en el área de su confluencia con el Río Paraguay". Tesis doctoral. En Pittau, M., A. Sarubbi y A. Menéndez. Análisis del avance del frente del delta del Río Paraná. INA, Laboratorio de Hidráulica. Buenos Aires.
- Parker G. (1985). "El subsuelo del Río de La Plata". Inf. Técnico. Serv. Hidrog. Naval. Buenos Aires. Inédito.
- Parker G. (1990). "Estratigrafía del Río de la Plata". Rev. Asoc. Geol. Arg., Vol. 45 (3-4): pp. 193-204.
- Parker G. y López Laborde J. L. (1988). "Morfología y variaciones morfológicas del lecho del Río de la Plata". En: SHIN - SOHMA. (Div. Geología Marina) Estudio para la Evaluación de la Contaminación en el Río de la Plata, Inf. Téc. No. 4, Tarea 2.1.3.
- Parker G. y López Laborde J. L. (1989). "Aspectos geológicos". En: CARP-SHIN-SOHMA (Ed.) Estudio para la Evaluación de la Contaminación en el Río de la Plata, Informe de Avance a la Comisión Administradora del Río de La Plata, págs. 1 - 72 y Separata, Planos 1 - 6.
- Parker G. y Paterlini C. M. (1990). "Apantallamientos acústicos en sedimentos gasíferos del Río de la Plata". Asociación Geológica Argentina, Revista XLV (1-2), pp. 17-28 Buenos Aires.
- Parker G. y Violante R. A. (1993). "Río de la Plata y regiones adyacentes". En: M. Iriondo (1993) (Ed.): El Holoceno en la Argentina, CADINQUA, 2: 163-230.
- Parker G., Marcolini S., Cavallotto J. L., Martínez H., López M. C., Ghiorzo D., de León A., Maza M. T., Ayup R. N. y López Laborde J. L. (1985). "Distribución de sedimentos en la superficie del fondo". En: SHIN -

- SOHMA. (Div. Geología Marina) Estudio para la Evaluación de la Contaminación en el Río de la Plata, Inf. Téc. No. 3, Tarea 2.
- Parker G., Marcolini S., Cavallotto J. L. y Violante R. A. (1987). "Modelo esquemático de dispersión de sedimentos en el Río de la Plata". *Revista Ciencia y Tecnología del Agua*, Santa Fe, Vol. 1 (4): pp. 68-80.
- Parker G., Paterlini M. y Violante R. A. (1994). "Edad y génesis del Río del Plata". *Rev. Asoc. Geol. Arg.*, Vol. 49 (1-2): pp. 11-18.
- Pittau M., Sarubbi A. y Menéndez A. N. (2001). "Análisis del avance del frente del delta del Río Paraná". INA, Laboratorio de Hidráulica. Buenos Aires.
- Pizarro M. J. y Orlando A. M. (1984). "Distribución de fósforo, nitrógeno y silicio disuelto en el Río de la Plata". *Serv. Hidrog. Naval, Publ. H.* 1-57. 625.
- Ravizza G. B. (1982). "Geología del Pleistoceno- Holoceno de la Is. Martín García, Río de la Plata Superior". Trabajo de Licenciatura UNBA, Fac. Cs. Exactas y Naturales, Dpto. Geología.
- Rinaldi V. y Zeballos M. (1996). "Experiencia en el uso de cristales piezocerámicos para el estudio dinámico de los suelos", Congreso Argentino de Mecánica de los Suelos GT96, Córdoba, Argentina.
- Rinaldi V. A., Ferrero H., Serrano C., Rinaldi C. y Ponti N. (2002), "Resistivity Survey In Shallow Depth Marine Environment", Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Boston, USA.
- Rinaldi V. A., Guichon M., Ferrero V. y Ponti N. (2006). "Resistivity survey of the subsurface conditions at the stuary of the Rio de La Plata", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE* en prensa.
- Rovereto G. (1911). "La sierra di Cordoba. Studi di Geomorfologia Argentina I". *Boll. Soc. Geog. Italiana*, Vol XXX, Roma.
- Rusconi C. (1931). "Datos sobre una capa marina de edad pampeana descubierta en Olivos, Prov. de Buenos Aires". *Physis X*. Buenos Aires.
- Santa Cruz J. N. (1970). "Estudio Geológico preliminar al E de la Sa. Chica". D.N.G.M. Inédito.
- Santa Cruz J. N. (1972). "Estudio sedimentológico de la Formación Puelches en la provincia de Buenos Aires". *Rev. Asoc. Geol. Arg.* Vol. 27(1): pp. 5-62, Buenos Aires.
- Sfriso A. O. (1997). "Caracterización de la Formación Postpampeano", *Boletín de la Sociedad Argentina de Mecánica de Suelos*, No 34.
- Terzaghi K. y Peck R. (1967). "Mecánica de los Suelos en la Ingeniería Práctica". Ed. El Ateneo.
- Torres P. (2005), Comunicación personal.
- Urien C. M. (1966). Distribución de los sedimentos del Río de la Plata Superior. *Bol. SHIN* Vol. 3(3): pp. 197-203.
- Urien C. M. (1967). "Los sedimentos modernos del Río de la Plata exterior, Argentina". *Servicio de Hidrografía Naval, Boletín*, Vol. 4 (2): pp. 113-213.
- Urien C. M. (1972). "Río de la Plata estuary environments". *Geol. Soc. of America, Memoir* Vol. 133: pp. 213-234.
- Urien C. M. y Ottman F. (1971). "Histoire du Río de la Plata au Quaternaire". *Quaternaria*.
- Urien C. M., Martins L. R. y Martins I. R. (1980a). "Evolução geológica do quaternario do litoral atlantico uruguaio, plataforma continental e regioes vizinhas". *Notas Técnicas, CECO - UFRGS*, Vol. 3: pp. 7-43.
- Urien C. M., Martins L. R., y Martins I. R. (1980b). « Modelos deposicionais en la plataforma continental de Rio Grande do Sul, Uruguai e Buenos Aires". *Notas Técnicas, CECO - UFRGS*, Vol. 2: pp. 13-85.
- Violante R. A., Parker G., Cavallotto J. L. y Marcolini S. (1992). "La secuencia depositacional del Holoceno en el Río de la Plata y la Plataforma del noreste bonaerense". *Resumen. 4 Reunión Argentina de Sedimentología*. Vol. 1: pp. 275-282. La Plata, Buenos Aires.
- Zeballos E. (1876). "Estudio geológico sobre la provincia de Buenos Aires". *Anales Soc. Científica Argentina*, Tomo II, Buenos Aires.